

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

**Zpevňování povrchů technologií hydroabrazivního
paprsku a jeho technologickými obměnami**

**Surface Hardening by Technology Hydroabrasive Jet
and its Technological Modifications**

Student

Michal Koniuch

Vedoucí bakalářské práce

doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.

Ostrava 2014

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě19.5.2014.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:19.5.2014.....



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Michal Koniuch

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Havířov – Na Polanech
19a/331 73601

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Koniuch**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Zpevňování povrchů technologií hydroabrazivního paprsku a jeho technologickými obměnami**
Surface Hardening by Technology Hydroabrasive Jet and its Technological Modifications

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu řešené problematiky.
2. Definování nedostatků a návrh řešení problému.
3. Experimentální metodika a experimentální ověření.
4. Výsledky a diskuze.
5. Nový přístup k řešeným problémům.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*, 1. vyd, Prešov : FVT TUKE, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [2] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Teoretické spracovanie a základný projekt prevádzkovej aplikácie automatizovaného riadenia technológie hydroabrazívneho delenia technických materiálov*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2008, 77 s. ISBN 978-80-553-0133-4.
- [3] HLOCH, Sergej; VALÍČEK, Jan. *Riadenie kvality povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením pomocou vibrácií a hluku*, 1. vyd., Prešov : FVT TUKE, 2009, 99 s. ISBN 978-80-553-0316-1.
- [4] SUMMERS, D. A. *Waterjetting Technology*. E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1995. ISBN 0-419-19660-9.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

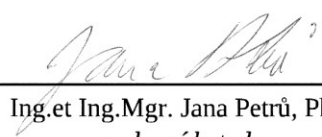
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Sergej Hloch, PhD.**


Konzultant bakalářské práce: Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu panu doc. Ing. Sergeji Hlochovi, PhD. a konzultantce paní Ing. Mgr. Janě Petrů, PhD. za rady a informace ke zpracování bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KONIUCH, M. *Zpevňování povrchů technologií hydroabrazivního paprsku a jeho technologickými obměnami*. Ostrava: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2014, Bakalářská práce, vedoucí HLOCH, S.

Bakalářská práce se zaměřuje na studium hydroabrazivního vodního paprsku a jeho stručným popisem zařízení. Tato práce se také dále zabývá studiem zpevňování povrchů různými strojírenskými technologiemi a nekonvenční metodou vodního paprsku pro snižování zbytkových napětí na materiálu. Technologie je experimentálně ověřena v několika fázích technologického postupu a zpracována do tabulek pro vyhodnocení účinnosti ke snížení zbytkových napětí na materiálu.

Klíčová slova: vodní paprsek, abrazivní vodní paprsek, zpevňování vodním paprskem

ANOTATION OF BACHELOR'S WORK

KONIUCH, M. *Surface Hardening by Technology Hydroabrasive Jet and its Technological Modifications*. Ostrava: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2014, Thesis, head Hloch, S.

Bachelor paper is aiming on study of hydroabrasive water jet and brief description of this device. This paper also discuss study of compaction surfaces using various machine technology and unconventional water jet method for dropping vestigial tension on material. This technology is experimentally verificate in several stages of technological progress and process into tables for evalutation of effectivity dropping vestigial tension on material.

Key words: water jet, abrasive water jet, water jet peening

Seznam použitých zkratk, veličin a symbolů.....	9
1 Úvod.....	10
2 Současný stav hydroabrazivního zpevňování materiálů.....	11
2.1 Historie abrazivního vodního paprsku	12
3 Konstrukce zařízení vodního paprsku	13
3.1 Řízení (ovládání) vodního paprsku	14
3.2 Řezání čistým vodním paprskem	14
3.3 Řezání abrazivním vodním paprskem	14
3.4 Abrazivní trysky	15
3.5 Druhy používaných paprsků	16
3.6 Druh pracovní kapaliny – média	17
3.6.1 Úprava vody.....	18
3.6.2 Aditiva	18
3.6.3 Chemické složení abraziv:	18
4 Zpevňování povrchů materiálů	20
4.1 Pulzující vodní paprsek	21
4.1.1 Fáze pulzujícího paprsku	21
4.2 Dopad kapaliny na pevný povrch.....	23
4.3 Vzdálenost trysky od plochy povrchu při zpevňování povrchu.....	24
4.4 Množství brusiva při zpevňování abrazivním vodním paprskem (AWJ)	25
5 Použití zpevňování při AWJ	26
5.1 Zpevňování ortopedických implantátů.....	26
6 Vytvrzování za studena.....	27
6.1 Tryskání.....	27
7 Vytvrzování za tepla	29
7.1 Vytvrzování laserem	29
7.1.1 Výhody laserového vytvrzování diodou	29
7.1.2 Aplikace vytvrzování laserem	30
7.2 Boridování povrchů.....	30
7.2.1 Technologický postup boridování	30
7.2.2 Vlastnosti boridovaných materiálů	31
7.2.3 Použití boridování.....	31
7.3 Cementování povrchů	32

7.3.1	Cementování v tuhém prostředí	32
7.3.2	Cementování v tuhých lázních.....	32
7.3.3	Cementování v plynu	33
8	Experimentální metodika a experimentální ověření	34
8.1	Zpevňování součástí vodním paprskem	34
8.2	Zátěžové zkoušky vzorků.....	37
8.3	Experimentální výsledky.....	37
8.3.1	Ovlivnění napětí plochým pulzujícím proudem	38
9	Závěr a nový přístup k řešené problematice	42
	Seznam použité literatury.....	43

Seznam použitých zkratek, veličin a symbolů

AWJ	Abrasive Water Jet (Abrazivní vodní paprsek)
Mpa	Megapascal
μm	Mikrometr
Ltd	Limited
CNC	Computer Numerical Control (Počítačové číselné ovládání)
WJM	Water Jet Machining (Obrábění vodním paprskem)
mm	Milimetr
v	Rychlost
AWJM	Abrasive Water Jet Machining (Obrábění abrazivním vodním paprskem)
kW	Kilowatt
NC	Numerical Control (Číslicové ovládání)
v_r	Radiální rychlost
p_s	Stagnační tlak
p_i	Impaktní tlak
$^{\circ}\text{C}$	Stupeň celsia
Fe	Železo
B	Bor
mm/s	Milimetr za sekundu
kHz	Kilohertz
Hz	Hertz
F_{max}	Maximální síla
kN	Kilonewton
F_{min}	Minimální síla
f	Frekvence

1 Úvod

V době, kdy jde technika neustále dopředu, narůstají požadavky na materiály a jejich vlastnosti. Vzhledem k tvrdosti a pevnosti materiálů se také ohlíží hlavně na povrchové úpravy kovů. Při zpevňování konvenčními metodami materiálů se nedosahuje vždy dobrých a dostačujících výsledků, například u válečkování, tryskání apod. Neustále se do popředí dostávají nekonvenční metody obrábění, které se uplatňují tam, kde konvenční metody nejsou dostatečně účinné, nebo nejdou vůbec použít a mají nežádoucí faktory. Zde je použití různých fyzikálních principů při obrábění (např. chemické, elektro-chemické, mechanické, optické a jiné). Vysokorychlostní abrazivní vodní paprsek (AWJ-Abrasive Water Jet) se používá obrábění a dělení materiálů a právě na tuto metodu je bakalářská práce zaměřena. Obrábění vysokorychlostním vodním paprskem je intenzivní, ekonomické a také hlavně ekologické. Lze obrábět všechny druhy materiálů, ať se jedná o dřevo, papír, plasty, stavební materiály, kovy a různé kompozitní materiály. Pro dnešní dobu se hlavně vodní paprsek zaměřuje na kompozitní materiály a tvrdokovy, což je v současné technologii velmi důležité a rozšířené.

Bakalářská práce se zabývá zpevňováním povrchů touto nekonvenční metodou (hydroabrazivním paprskem) ve srovnání s jinými, určitými, ať už nekonvenčními nebo klasickými konvenčními metodami.

Cíl bakalářské práce

Cílem bakalářské práce je zjišťování tvrdosti povrchů materiálu vytvrzených vodním paprskem při různých parametrech a jinými technologickými metodami. Analýza současného stavu této metody. Experimentální zkouška zpevňování povrchu na daném materiálu včetně ověření. Dále analýza naměřených výsledků a jejich porovnání.

2 Současný stav hydroabrazivního zpevňování materiálů

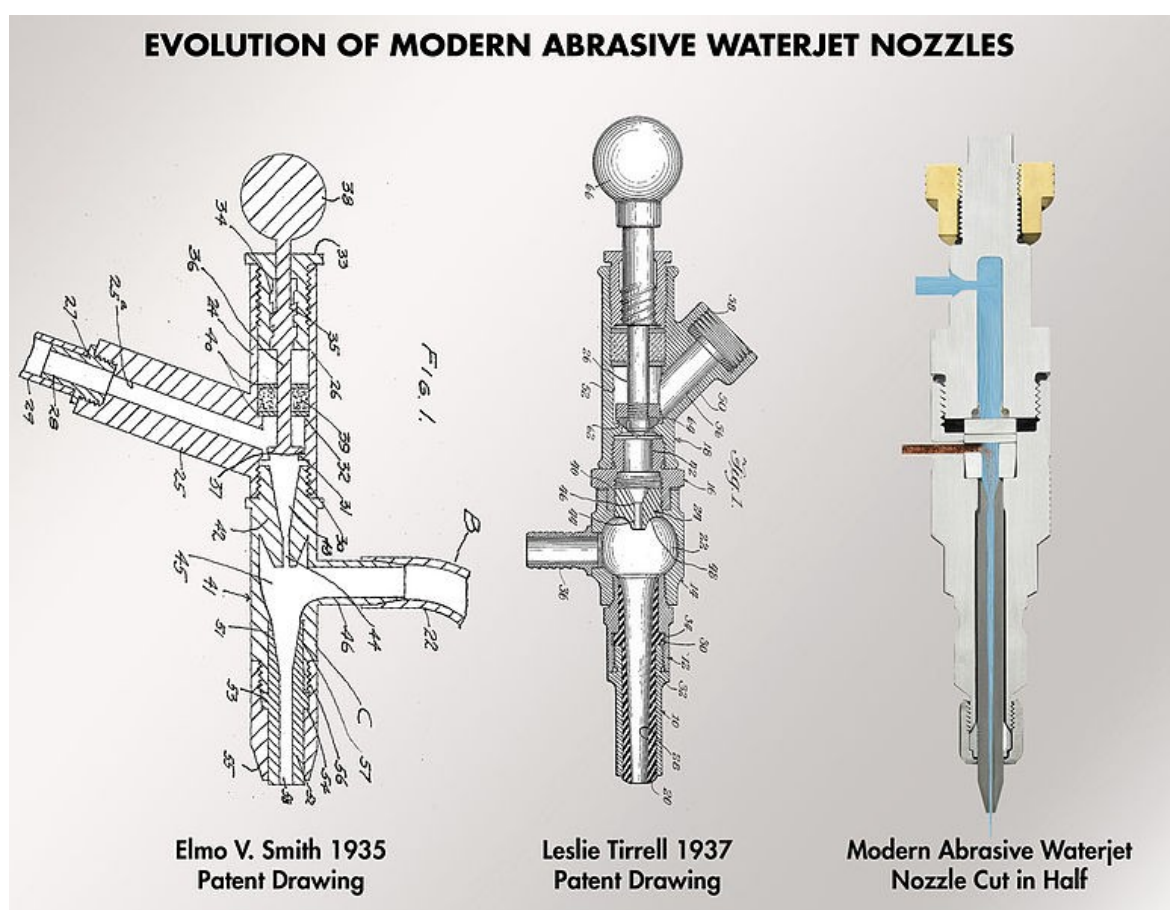
Zpevňovací proces v technologii abrazivního vodního proudu je způsobený silovým, napěťovým a deformačním účinkem nástroje na povrchu materiálu. Nástroj je zde definován jako směs vody a abraziva. [1]

V posledních letech v oblasti vysokorychlostních abrazivních paprsků roste tlak na další vývoj ve využití této nekonvenční technologie. Výzkumné stanice se snaží o zdokonalení, aby se technologie přibližovala co nejblíže k ekologickým požadavkům, dále zvýšení výkonnosti současně s ekonomickou stabilitou. Právě proto se technologie zaměřuje na vysokorychlostní vodní paprsek s použitím generování vodních tlaků. Dnes už jsou vysokotlaká zařízení generována tlakem až 700Mpa, což ale způsobuje vysoké namáhání a opotřebování součástí stroje a jeho zařízení, jako je např. čerpadlo, které tyto tlaky negativně ovlivňují. Proto se pracovníci Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i. zaměřili na alternativní přístup, jak eliminovat ultra vysoké tlaky při dopadu kapky na pevný povrch. [2]

Již v minulosti byly materiály tryskány ocelovými kuličkami, skleněnými kuličkami, pískem apod. Kuličkování je definováno jako změna deformací na povrchu materiálu při nárazu. Mezi zpevňovacími procesy se řadí už dávné kovářské metody, kdy byl kov vytvrzován opakovanými nárazy. Na tomto mechanickém principu je založeno zpevňování povrchu abrazivním vodním paprskem. Dnes se zpevňování běžně používá na různorodých kovech, jako slitiny železa, titanu, tradičních materiálů apod. Kuličkování se značně používá v jaderném a leteckém průmyslu. [8]

2.1 Historie abrazivního vodního paprsku

Řezání vodou bylo v minulosti možné pouze pro měkké materiály, přidáním abraziva se řezání vodním paprskem na moderních obráběcích strojích stalo použitelné pro všechny materiály. V roce 1935 přišel s vynálezem Elmo Smith, který vymyslel přidávání do vody brusivo a v roce 1937 na Hydroblastní Korporaci doplnil nápad Leslie Tirrele, který vynalezl návrh trysky s vysokotlakým mixem vody a abraziva. Dr. Mohamed zabývající se výzkumem vysokotlakých čerpadel zdokonalil práci vodních trysek a abrazivních příměsí k modernímu řezání vodním paprskem (AWJ – Abrasive water jet). Nejkritičtější částí vývoje bylo vytvořit trvalé směšovací trubici, která by mohla vydržet sílu vysokotlakého abrazivního vodního paprsku, a to byly boridové produkty pro rozvoj jejich řady keramických karbidů wolframu a kompozitních trubek, které výrazně zvýšily provozní životnost vodní trysky. [4]



Obr. 1 Vývoj směšovací trysky pro hydroabrazivní řezání [4]

3 Konstrukce zařízení vodního paprsku

Hydraulické zařízení na generování vysokorychlostního vodního paprsku splňující požadavky vysokého tlaku se skládá ze dvou okruhů:

- z primárního (nizkotlakého),
- sekundárního (vysokotlakého).

Vysokotlaký okruh řídí okruh nizkotlaký, který je vyvozený prostřednictvím tlaku hydraulickou jednotkou.

Hlavní části vysokotlakého okruhu:

- zdroj (generátor) tlaku technologické kapaliny,
- filtrační jednotka – je zařazená za zdrojem technologické kapaliny, filtruje kapalinu oddělením nečistot velikostí už od 1, 2 a 5 μm ,
- akumulátor tlaku – vysokotlaková nádoba tlumící rázy v technologické kapalině vyvolané vznikem pulzací tlaku
- uzavírací ventil – umožňuje krátkodobé, nebo i úplné přerušení průtoku kapaliny, a tím řídí režim dělení materiálů,
- rozváděcí elementy – zabezpečují přenos kapaliny do míst obrábění prostřednictvím hadic, potrubí, otočných elementů apod.,
- výstupní trysky – z hlediska vlastností paprsku kapaliny nejdůležitější část vysokotlakého zařízení, přímo ovlivňující kvalitu řezného paprsku, a tím i kvalitu řezu.

Používají se dva druhy zařízení generující vysokotlaký vodní paprsek. To je zařízení s multiplikátorem – jeho výrobcem je americká firma Flow Systems, a zařízení s triplexovým plunžrem – jeho výrobcem je japonská firma Sugino Machine, Ltd. [6]

3.1 Řízení (ovládání) vodního paprsku

Tradiční výrobní řetězce zařadili i řezání vodním paprskem a proto je nezbytné jejich přesné a spolehlivé řízení. Řízení vodního paprsku se přizpůsobilo CNC systémům založených Johnem Parsonem se systémem G-kódů. V dnešní době je největším výrobcem vodních paprsků firma Flow International Corporation (Washington), kteří mají celosvětově uznávaný software OMAX a jeho využití je po celém světě. Systém OMAX pracuje rychle, jednoduše a velmi přesně. [4].

Nutností je ultra vysoký tlak, aby byla rychlost trysky dostatečně vysoká, tím způsobuje kovový povrch poddajný a to buď kapalinou, nebo s kapalinovou příměsí (např. led, abrazivo). Tryska se pohybuje v závislosti na obrobku. Tento pohyb je prováděn ve dvou a třech osách, nebo samotným pohybem obrobku k trysce. Tato metoda zahrnuje různé pohyby a rychlosti, stejně jako úhel naklonění trysky a síly dopadu paprsku. [8]

3.2 Řezání čistým vodním paprskem

Jedná se o technologii (WJM - Water Jet Machining) mechanického dělení používanou k řezání měkkých materiálů, při kterém je materiál mechanicky postupně narušován samotnou vodou díky vysokému tlaku. [5] Místo řezu je studené, tím pádem nedochází k teplotním změnám krystalové struktury materiálu. Technologie je bezprašná, a proto vysoce ekologická. Princip obrábění vodním paprskem spočívá v generování vysokého tlaku kapaliny (nejčastěji vody), která při průtoku vodní tryskou malého průměru (cca 0,3mm [10]) získává velmi vysokou rychlost (až 3-násobek rychlosti zvuku), čímž nabude velmi vysoké kinetické energie, která je schopná obrábět téměř všechny známé materiály [6].

3.3 Řezání abrazivním vodním paprskem

Jedná se o technologii (AWJM - Abrasive Water Jet Machining) mechanického dělení používanou k řezání tvrdších materiálů, voda plní funkci urychlovače abrazivních částic. V případě dělení s příměsí abrazivních částic je tedy řezaný materiál mechanicky

narušován částicemi a nikoliv jen vodou. [5] Technologie vysokotlakého vodního paprsku je v současnosti dostatečně známá a rozšířená v praxi, proto byla technologie zařazena do skupiny nekonvenčních způsobů obrábění. Využívá hydrodynamický, resp. hydroabrazivní účinek vysokorychlostního vodního paprsku na obrábění materiálů. Díky svým mimořádným vlastnostem tato technologie našla velmi rychle uplatnění v leteckém, kosmickém nebo hornickém průmyslu a kvůli velké univerzálnosti i v celé řadě dalších průmyslových odvětvích. [6]

3.4 Abrazivní trysky

Nejefektivnější zvýšení řezací schopnosti čistého vodního paprsku je možné dosáhnout přidáním abraziv do vody. Abraziva se přidávají ve formě prášků, mikročástic křemičitého písku, drobných syntetických granulátů, ocelových kuliček, ocelové drtě apod. Řezání abrazivním vodním paprskem je při nízkých tlacích (0,2 až 2 Mpa) málo efektivní. Při zvýšení pracovních tlaků podstatně narůstá kinetická energie vodního paprsku, zvyšuje se výrobnost procesu, rozšiřují se technické možnosti, možno obrábět těžkoobrobitelné materiály apod. Používané průměry abrazivních trysek jsou v rozmezí 0,8 až 2,2 mm, eventuálně více, v závislosti na technologické aplikaci a zdroji tlakové kapaliny (od dodávaného množství vody).

Vzhledem k tomu, že jako abrazivní materiály se v současnosti používají granát, olivín, křemičitý písek, korundový prášek, ocelová drť apod., jsou abrazivní trysky v procesu řezání velmi intenzivně namáhány na opotřebení. Proto abrazivní trysky byly vyráběné z vysoko odolných materiálů proti opotřebení, jako např. karbid wolframu vyrobený práškovou metalurgií. V současnosti se podle požadavků zákazníka už vyrábějí abrazivní trysky z kubického nitridu boru, řezné keramiky nebo daleko pevnější z karbidu wolframu s iontovou implantací. Je možné pouze konstatovat, že za běžných podmínek dosahují kapalinové trysky životnost cca 80 pracovních hodin a abrazivní trysky z karbidu wolframu s iontovou implantací cca 100 hodin, přičemž se hodnoty můžou značně lišit. [6]

Typy trysek pro abrazivní vodní paprsek (Obr. 2) s různými možnostmi přívodu brusiva a jeho směšování s vodou. Konstrukce trysek podle (Obr. 2a) představuje lehce vyrobitelné trysky s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva s možností použití i pro čistý vodní paprsek. Výhodou trysek podle schématu na (Obr. 2b) je axiální přívod brusiva, tento způsob přívodu brusiva zlepšuje jeho

směšování s vodou a tím zmenšuje opotřebení obvodu trysky. Brusivo je přiváděné přes směšovací komoru do vysokotlakého proudu vody. Ve směšovací komoře se brusivo smíchává s vysokotlakou vodou a poté přechází přes trysku, ve které má otvor (štěrbina) průměr v rozmezí 0,75 – 2,5mm. Výkon vodního paprsku se pohybuje mezi 7 – 45 kW. [10]



Obr. 2 Trysky pro abrazivní vodní paprsek (AWJ) [10]

- a) tryska s jednoduchým vodním paprskem a radiálním přívodem brusiva
- b) trysky se směšovacím paprskem a axiálním přívodem brusiva

3.5 Druhy používaných paprsků

Podle možností zařazení, jeho konstrukce a požadavků na použití existují tři nejčastější druhy používaných paprsků.

- Systém pulzujícího paprsku, používá opakované a krátkodobé trvání impulzu paprsku, vznik tlakových špiček, které urychlují rozšiřování řezné mezery. Metoda je vhodná pro vrtání, řezání, lámání a drcení hornin, uplatnění v báňské těžbě.
- Systém kontinuálního paprsku je charakterizovaný stálou energií hladiny paprsku po dobu procesu, je to nejvíce rozšířená metoda pro dělení materiálu, používá se při řezání prakticky všech druhů materiálů.
- Systém kavitačního paprsku pracuje na principu jevu lokálního porušení materiálu destrukční silou kavitačních bublin, kavitační paprsek kontinuální s obsahem kavitačních bublin. [6]



Obr. 3 Rozdělení kapalinových paprsků [9]

3.6 Druh pracovní kapaliny – média

Pracovní látka vodního paprsku musí mít následující vlastnosti:

- nízkou viskozitu, zabezpečující malé ztráty výkonu toku kapaliny při průchodu potrubím, hadicemi a tryskou
- minimální agresivnost s ohledem na kovové části zařízení
- malou toxicnost, tj. kapalina nesmí dráždit pokožku, dýchací cesty a zrak obsluhy
- běžnou přístupnost
- nízkou cenu
- schopnost splňovat hydrodynamické charakteristiky vysokorychlostního paprsku malého průměru
- schopnost zabezpečovat maximální produktivitu
- schopnost zabezpečovat nejlepší kvalitu obrábění při nejmenších energetických ztrátách na formování paprsku

Z globálního aspektu uvedeným požadavkům nejlépe vyhovuje obyčejná voda H_2O , která je nejdostupnější, nejlevnější a není agresivní při styku s kůží. [6]

3.6.1 Úprava vody

Úprava vody je důležitý faktor z hlediska zanášení otvoru trysky. Nejvhodnější je demineralizovaná a deionizovaná voda. Otvor trysky musí být chráněn před různými příměsi ve vodě, které mají tendenci se usazovat ve štěrbině trysky. Dodržení kvality vody ovlivňuje životnost trysky, těsnění a ventilů. Úprava vody ovlivňuje také kvalitu řezu, kvalitu finálního opracování a celkové provozní náklady. [10]

3.6.2 Aditiva

Aditiva (přísady) do vody jsou různé přípravky různých polymerů s lineárními molekulami. Aditiva vytváří souvislý paprsek a ani po styku s materiálem se paprsek neroztříští. Paprsek je poté při řezání účinnější, energie koncentrovanější na místo řezu a uchovává si kompaktní jádro. [6]

3.6.3 Chemické složení abraziv:

GRANÁT Barton $\{Fe_3 Al_2(Si O_4)_3\}$



Obr. 3 Přírodní Granát [18]

Abrazivo s ostrými hranami červeno hnědé barvy. Neobsahuje křemík ani jeho podoby, a proto vhodný jako náhrada křemičitého písku. Nejčastěji používán k odstranění barvy, okují a rzi, ale hlavně k tryskání kovových materiálů před jejich povrchovou úpravou (chromování, zinkování a metalizace). Vhodný pro abrazivní příměsi pro použití u technologie řezání a obrušování vodním paprskem. [28]

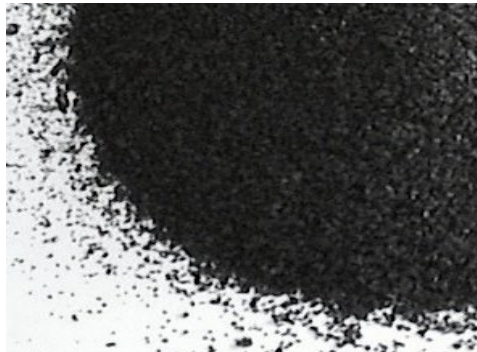
OLIVÍN 24 ($\text{Mg}_2 \text{SiO}_4$)



Obr. 4 Přírodní Olivín [19]

Teplota tání fosteritu je 1890°C . Velmi vhodná surovina k výrobě žáruvzdorných materiálů. V chemickém průmyslu je olivín používán pro výrobu hnojiv. Vhodný materiál pro brusiva a abraziva k čištění materiálů otryskáváním a řezání materiálů vodním paprskem.

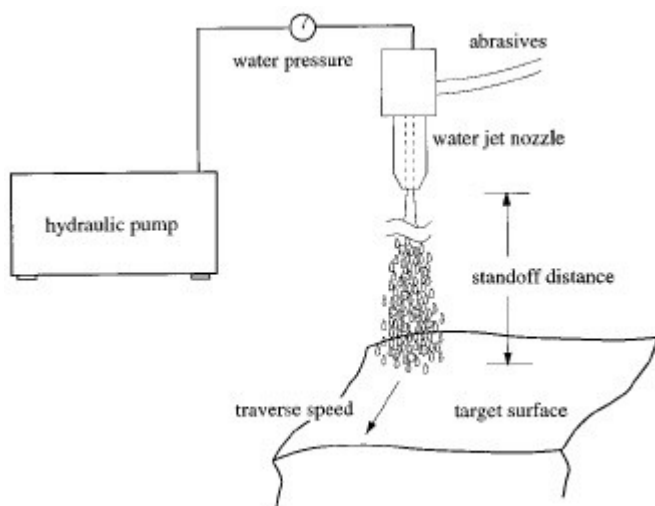
SILIKÁTOVÁ STRUSKA Al/Cu [6].



Obr. 5 Silikátová struska [26]

4 Zpevňování povrchů materiálů

Abrazivní zpevňování vodním paprskem (AWJ) je nový výrobní proces, který je navržen k povrchové úpravě kovů. Ve vztahu k ostatním běžným metodám výroby lze AWJ zpevňování (peening) považovat za kombinaci obrábění vodním paprskem a kuličkování. Postup se skládá z vysokotlakého abrazivního paprsku, který je poháněn do cílového materiálu na vybrané orientace proudových nárazů. Výsledky z trysky, kde je vysoký zdroj tlakové vody, která se může pohybovat v rozmezí 50-300 Mpa, slouží jako médium pro přenos abrazivních částic na povrch. V porovnání s obráběním abrazivním paprskem je poměrně velká vzdálenost trysky od materiálu. AWJ kuličkování umožňuje tryskovou expanzi nárazu na materiál a slouží ke zvýšení povrchové úpravy plochy. Schéma z AWJ kuličkování důležitých procesních parametrů je uvedeno na (Obr.6). Srážka paprsku při AWJ zpevňování vyvolává erozi a lokalizované deformace substrátu. Konkrétní funkci nárazového proudu zlepšují mechanické vlastnosti (např. tažnost, tvrdost a deformační zpevnění). AWJ obrábění a zpevňování vodním paprskem kovů, mají ve výsledku zbytková napětí, které je možné eliminovat správnou volbou řezných podmínek. [7]



Obr.6 Schéma procesu zpevňování AWJ [7]

Zpevňování (peening) na povrchu materiálu s mechanickým nebo proudovým dopadem vln. Hlavním cílem zpevňování je zavést tlak v rovině zbytkového napětí povrchu a pod povrchem daného materiálu. Snížit materiálovou a korozní únavu.

Ke zpevňování se používají materiály, které jsou bezpečnostně důležité nebo citlivé, zároveň jsou vystaveny vysokému opotřebení a únavovému zatížení jako je např. ozubení. [27]

Záměrem této techniky je odstranění poškozených povrchů materiálu a zbytkových napětí. Tlakové napětí na povrchu vytvořené vodním paprskem výrazně podporuje životnost komponentů. Ošetření povrchu pomocí abrazivního média musí být provedeno na úrovni dostatečného tlaku pro dosažení požadovaných výsledků a s dostatečným pokrytím povrchu součástí. Úplné pokrytí povrchu je výhodně koordinováno prostřednictvím číslicového řízení (NC) programu. [12]

Hlavním faktorem, který určuje životnost součástí je integrita povrchu. Může být definována jako výsledek změn vyrobených v povrchové vrstvě při výrobě konstrukčních částí a má vliv na vlastnosti materiálu v provozu. Typicky tři faktory jsou považovány za integritu povrchu: konečný povrch, mikrostruktura a zbytkové napětí. [12]

4.1 Pulzující vodní paprsek

Pulzující vodní paprsky jsou generovány dostatečně vysokotlakou pulsací na výstupu trysky. Na výstupu se tedy vytváří proměnná rychlost paprsku a začne se tedy jednat o pulzující proud. Využití pulzujících účinků spojených s vodou při dopadu na pevný povrch tedy vedou ke značně vyššímu výkonu, lepší adaptace povrchu a dalších náročných požadavků, jako je ohled na životní prostředí a ekonomická hlediska. Kapalina dopadající na povrch se skládá ze dvou etap. [13]

4.1.1 Fáze pulzujícího paprsku

Kapalina dopadající na povrch se skládá ze dvou etap. Během první fáze se kapalina chová jako stlačitelná a generuje impaktní tlaky tzv. (water hammer), neboli „vodní kladivo“. Z těchto tlaků je většina škod na povrchu vyplívající z kapaliny na pevném povrchu. První fáze dopadu kapaliny trvá řádově několik mikrosekund. Odpovídá době

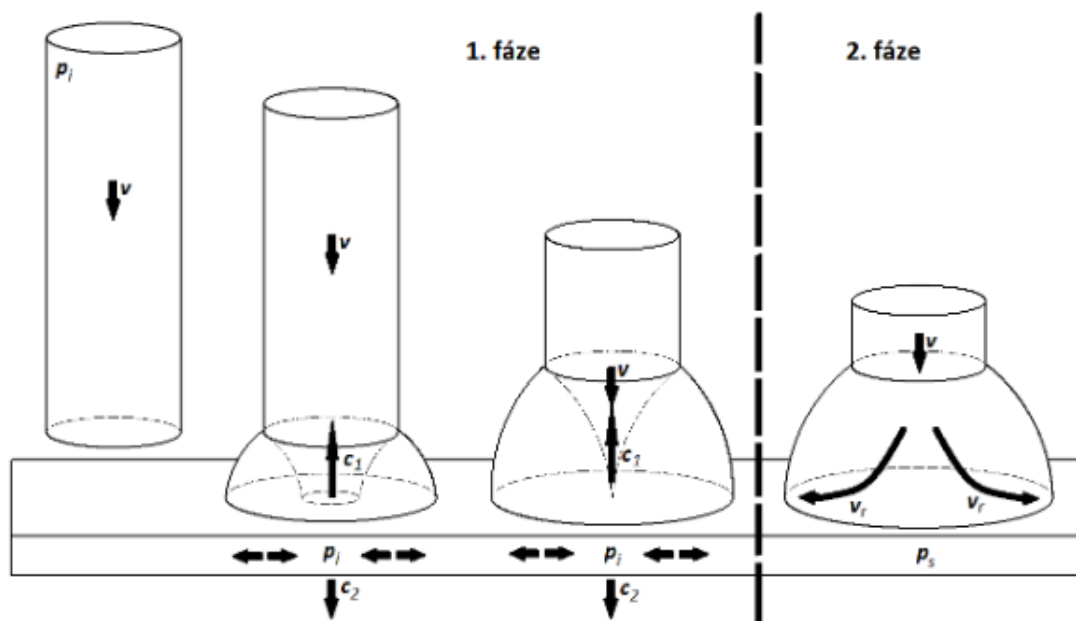
potřebné k přesunutí vlny, poklesu tlaku z místa vnějšího kontaktu paprsku a dopadové plochy do středu dopadajícího paprsku.

Po odeznění impaktního tlaku začíná druhá fáze dopadu kapaliny. V okamžiku, kdy je překročena mez tlakové deformace kapaliny, kapalina začíná proudit radiálně kolmo k ose paprsku směrem ven podél dopadové plochy. Rychlost radiálního toku v_r může být až pětinasobně vyšší, než je dopadová rychlost kapaliny v , a v jeho důsledku tedy na povrch materiálu působí nejen normálové síly od dopadu paprsku, ale i síly smykové. Je-li povrch nerovný či jakkoliv porušený, radiální proudění kapaliny může vyvolat tak vysoké smykové síly, že jsou schopny vytvořit lokální smykové trhliny i na povrchu vysoce pevných materiálů. [13]

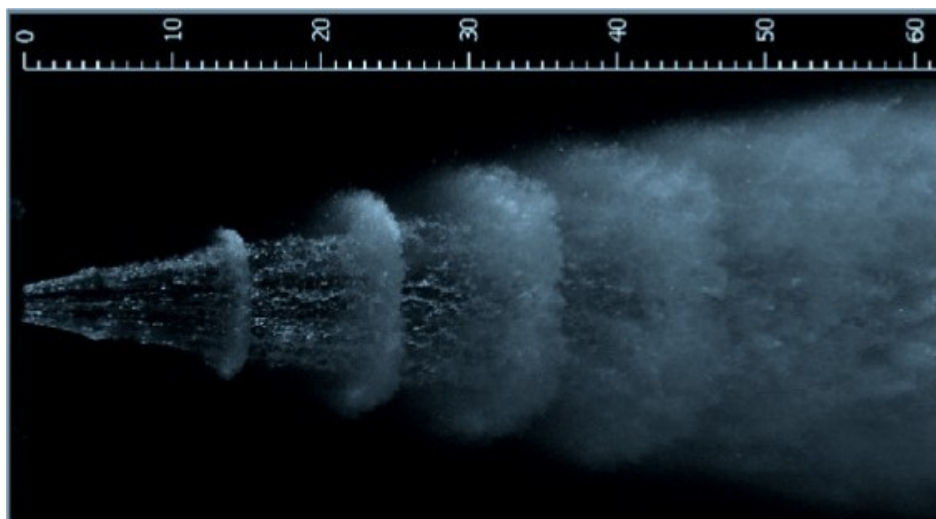
V průběhu druhé fáze dopadu se kapalina chová jako nestlačitelná a tlak v centrální ose paprsku poklesne na mnohem nižší tzv. Bernoulliho stagnační tlak p_s , který pak trvá relativně dlouhou dobu.

Impaktní tlak p_i je mnohonásobně vyšší než stagnační tlak p_s – v závislosti na tlaku před tryskou je přibližně 4krát až 20krát vyšší než tlak stagnační.

Vzhledem k tomu, že kontinuální vodní paprsek působí na materiál v podstatě pouze stagnačním tlakem, je tedy žádoucí rozdělit jej na řadu „kapek“, schopných vyvolat při dopadu také impaktní tlak a využít tak jevy doprovázející dopad kapky na materiál ke zvýšení účinků vysokorychlostních vodních paprsků [2].



Obr. 7 Fáze dopadu kapaliny na pevný povrch [14]



Obr. 8 Pulzující vodní paprsek generovaný tlakem 20Mpa (stupnice udává vzdálenost od trysky v mm) [13]

4.2 Dopad kapaliny na pevný povrch

Při střetu kapaliny pohybující se vysokou rychlostí s tuhým tělesem vzniká krátkodobý přechodový jev, který je provázen výrazným nárůstem tlaku v místě dopadu kapaliny na povrch. Může způsobit vážné poškození jak na povrchu, tak i ve vnitřní struktuře

materiálu vystaveného působením dopadající kapaliny. Nutnost studia jevů, k nimž při dopadu kapky na pevný povrch dochází, byla v minulosti vyvolána především potřebou předcházet erozi lopatek parních turbín. V současnosti probíhá např. výzkum dešťové eroze působící na letadla a rakety, především na materiál kolem oken. S dopadem kapaliny na pevný povrch těsně souvisí také kavitační eroze.

4.3 Vzdálenost trysky od plochy povrchu při zpevňování povrchu

Vzdálenost při zpevňování je obecně větší než vzdálenost využívaná ve známé praxi abrazivním vodním paprskem obrábění nebo řezání. Tryska je umístěna tak, aby byla při zpevňování na optimální vzdálenosti od cílového povrchu. Odstup při zpevňování je definován jako vzdálenost, která umožní, aby proud vodního paprsku expandoval před nárazem na povrch a vytvořil se požadovaný strukturovaný povrch. Optimální vzdálenost se mění v závislosti na jiných parametrech, což je například úhel dopadu, tlak vodního proudu nebo velikost abrazivních částic [11].

Vzhledem k faktorům (tlak vodního proudu, úhel dopadu paprsku, velikosti abrazivních částic) je přednostní minimální odstup přibližně 25mm pro umožnění dostatečné tryskové expanze před nárazem a aby nedošlo k obráběcím účinkům. Maximální vzdálenost trysky je cca 200 mm, aby dosáhla dostatečné deformace a zpevnění cílové plochy. Například při vytvrzování ze vzdálenosti 25 až 35 mm, je tlak vody kolem 50 až 80 Mpa dostačující k deformaci a zpevnění povrchu bez obrábějících účinků. Při vzdálenosti kolem 140 až 160 mm, musí být tlak vody větší, což se pohybuje mezi 270 až 300 Mpa. [11]

4.4 Množství brusiva při zpevňování abrazivním vodním paprskem (AWJ)

Při vytvrzování povrchu je množství brusiva oproti obrábění nebo řezání podstatně menší. Aby se dosáhlo správné deformace povrchu bez řezání nebo obrábění obrobku, bude množství brusiva záviset také na jiných parametrech procesu, jako je např. úhel dopadu paprsku, tlak vodního proudu a odstupní vzdálenosti trysky. Obecně bylo zjištěno, že průtoky abrazivního materiálu v rozmezí 45 – 180 gramů za minutu se dosáhne požadované deformace bez obráběcího efektu [11].

5 Použití zpevňování při AWJ

5.1 Zpevňování ortopedických implantátů

Kloub je jedním z nejčastějších chirurgických procedur pro lidi, kteří trpí artritidou. Výzkumy zjistili, že dlouhodobý úspěch je často negativně ovlivněn ztrátou fixace mezi protézou a kostí v necementované části kloubu nebo mezi protézou a kostním cementem. Na klouby lze aplikovat porézní nátěry, které podporují stabilní fixaci a také kovové plazmové spreje. Při těchto aplikacích je pravděpodobnost přežití vyšší než 95%. Je výhodné, aby zbytková napětí na implantátech byla co nejnižší v důsledku vyšší životnosti preparátu.

V prvním kroku se používají granátové částice jako brusný materiál k vytvoření broušené plochy na cílovém povrchu a ke zpevnění povrchu. Granátové brusné částice poháněné na cílovou plochu kovového implantátu nejsou určeny k zapouštění do povrchu.

Ve druhém kroku se používá biokompatibilní materiál jako je hydroxyapatit. Používá se jako brusný materiál, který vytvrzuje povrch. Kromě toho, že vytváří texturovaný povrch, jsou tyto částice záměrně zapouštěny do materiálu a mají schopnost stimulovat růst kostí a současně ovlivňuje zbytkové napětí, což je důležité pro životnost komponentu [11].

6 Vytvrzování za studena

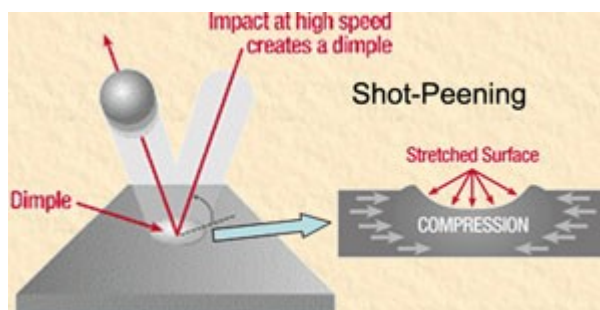
6.1 Tryskání

Tryskání je proces, kde se dynamicky pohánějí brusné a ocelové částice na povrch materiálu. Částice jsou poháněny pomocí generátoru stlačeného vzduchu, nebo pomocí rotujících lopatek. Tento proces se používá v mnoha odvětvích:

- Letecký průmysl
- Automobilový průmysl
- Lodní průmysl
- Gumárenský průmysl
- Lékařský a chirurgický průmysl apod. [20]

Ocelové kuličky a abrazivní částice působí plasticky na povrchu materiálu a mění jeho mechanické vlastnosti. Hlavní použití je zamezení rozšiřování mikrotrhlin, aby se nešířili do materiálu. Při tomto způsobu se únavová životnost materiálu může zvýšit až o 1000%. Vytvrzování tryskáním se používá u strojních součástí převodovek, vaček a vačkových hřídelů, spojkových a vinutých pružin, ojníc, lopatek turbín apod. [21]

Mezi dokončovací operace patří právě kuličkování, kdy se jedná o zpevnění povrchu zatlačováním materiálu. Při této operaci se musí dbát na správně seřízené stroje, množství přidávaných ocelových kuliček a množství přiváděného tlaku. Pokud se tyto faktory nenastaví správně, může dojít k nad nebo pod tryskání, což má za následek nežádoucí plastické deformace jako jsou např. trhliny na povrchu a pod povrchem materiálu. [20]



Obr. 9 Plastická deformace při nárazu ocelové kuličky na povrch [20]

Tryskání se stalo jedním z nejdůležitějších procesů v mnoha průmyslových odvětvích díky svým schopnostem zlepšovat únavovou životnost materiálu a prodloužení životnosti

kritických komponentů, které by mohly při zátěži selhat. Kovová únava materiálu nastane, když cyklické zatížení a zároveň tahové napětí působí na materiál, čímž způsobí trhliny v této namáhané oblasti. [22]

7 Vytvrzování za tepla

7.1 Vytvrzování laserem

Lasery v dnešní době nabízejí rychlé, reprodukované a vysoce kvalitní metody tepelného zpracování. Povrchové kalení laserem se skládá z rychlého ohřevu povrchu materiálu laserovým paprskem, který krátce drží materiál na požadovanou teplotu a poté intenzivním ochlazením díky vysoké tepelné vodivosti materiálu.

Významnou výhodou laserového kalení je schopnost provést místní vytvrzení na předepsané poloze. Hloubka kalení a výsledná tvrdost může být řízená aktuální (on-line) kontrolou teploty díky pyrometru postaveném na optickém systému.

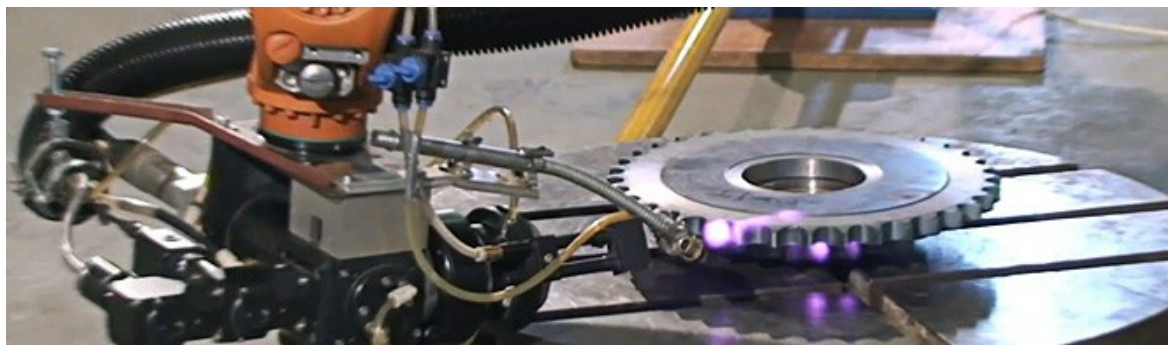
7.1.1 Výhody laserového vytvrzování diodou

- Lokální kalení omezeno na předepsané místo
- Vynikající kvalita, rychlost a stabilita materiálu
- Snížený tepelný účinek na okolní materiál
- Minimální zkreslení
- Bez povrchového popraskání
- Nízká povrchová oxidace

Laserový paprsek oproti konvenčním metod intenzivně zahřívá jen povrchové vrstvy materiálu pod teplotu tavení a zbytek materiálu se drží na teplotě prostředí. Teplo, které je vnesené do povrchu materiálu se převádí do základního materiálu součásti. Jedná se o samo-ochlazovací efekt, který způsobuje vznik jemnozrnné martenzitické struktury s vysokou tvrdostí a zároveň zachování houževnatosti jádra součásti. Díky laserovým systémům průmyslových robotů se zachovává přesné zpracování ploch součástí. [16]

7.1.2 Aplikace vytvrzování laserem

Typické aplikace zahrnují místní kalení forem, nástrojů, ozubených kol a ozubených hřebenů, díly převodovek, hřídele, vačky a lopatky turbín. [15]



Obr. 10 Vytvrzování laserem ozubeného kola [15]

7.2 Boridování povrchů

Boridování patří mezi chemicko-tepelné zpracování materiálů. Nadifudovaný bor s železem vytváří tvrdou vrstvu ze sloučenin, která je mimořádně odolná proti abrazivnímu otěru a nízkým sklonem k nalepování.

7.2.1 Technologický postup boridování

Dle diagramu železo – bór vznikají při reakci bóru s železem sloučeniny FeB , což se skládá z 16,23 hm. % bóru a sloučeniny Fe_2B (8,83 hm. % bóru). Boridové vrstvy jsou charakterizovány zubovým spojením mezi základním materiálem (nelegované a středně legované oceli), síla mezi boridovou vrstvou a základním materiálem je závislá na teplotě a na době zpracování. V závislosti na počtu procent přidaných legur v zákl. materiálu klesá závislost spojení boridové vrstvy s materiálem, ale zvyšuje se tvrdost zpracovaného materiálu. Boridování se provádí v komorových nebo trubkových pecích, které mají výhody s vyvětráváním splodin vznikajících při této technologii. Jako nejvyužívanější plyn, který vyvětrává splodiny se používá Argon. Teplota v pecích se pohybuje v rozmezí 850°C až 1000°C a tloušťka boridové vrstvy je závislá na době

procesu. Mezi jednotlivými díly se tloušťka pohybuje v rozmezí 20 až 250 μm . Ochlazování probíhá pozvolně na vzduchu. [17]

7.2.2 Vlastnosti boridovaných materiálů

- Vynikající ochrana při abrazivním namáhání
- Nízké sklony k nalepování
- Vysoká tepelná odolnost
- Odolnost proti oxidačnímu otěru [17]

7.2.3 Použití boridování

Značné využití se nachází v oboru strojírenství při výrobě nástrojů, které vyžadují velmi dobré a přesné vlastnosti. Dále při výrobě nástrojů v těžebním a stavebním průmyslu, za účelem snížení abrazivního opotřebení. Proti ulpívání se boridování používá také ve sklářském průmyslu na trnech, které mají vysoké požadavky hladkého povrchu. [17]



Obr. 11 Sklářský trn [17]

7.3 Cementování povrchů

Při cementování se materiál nasycuje uhlíkem v pevném, kapalném nebo plynném prostředí, používá se na měkkých ocelích s obsahem uhlíku max. do 0,2 a při teplotách nad A_{c3} . Zakalením vrstvy se dosahuje vysoké tvrdosti, zatímco jádro zůstává houževnaté. Nauhličená vrstva má tloušťku v rozmezí 0,5 až 1,5 mm. [23]

7.3.1 Cementování v tuhém prostředí

Materiál je vkládán do litinových nebo plechových krabic, které jsou určeny k cementování a zasypou se práškem, který se skládá z 60% dřevěného uhlí, poté se zahřívají na teplotu 850 až 900°C. Ohřev trvá 1-4 hodiny a cementační vrstva je 0,5 až 1 mm. Kontrola nauhličené vrstvy se provádí na kontrolních cementovaných tyčinkách, které jsou zakaleny a poté zlomeny. Podle lomu se zjišťuje hloubka cementace. [23]

7.3.2 Cementování v tuhých lázních

Cementování se provádí v solích, jako je např. uhličitán sodný, chlorid sodný atd. Uhlík se do povrchu kovu dostává pomocí kyanidu, který zde působí jako přenašeč a s uhlíkem se také do povrchu dostává dusík. Jelikož jsou ale tyto látky kyanidů velmi jedovaté a nešetrné k životnímu prostředí, je tato metoda zakázaná. V dnešní době se provádí výzkumy tavenin, které nejsou tak jedovaté a nahradili by tuto metodu. Nevýhodou je náročná likvidace lázně, ochrana životního prostředí a jedovatost, mezi výhody patří krátká doba procesu. [23] [24]

7.3.3 Cementování v plynu

Cementování se provádí za atmosférického tlaku a plyny jsou v termodynamické rovnováze. Nejpoužívanější plyny jsou svítiplyn, metan a další uhlovodíky nebo plyny, které obsahují kysličník uhelnatý. Lze také použít kapaliny, které svým rozkladem při zahřátí vylučují plyny, tyto kapaliny mohou být acetyleny, terpentínové oleje a etylalkoholy. Zahřívání probíhá v odporových pecích a doba trvání cementace je okolo 3 hodin. [23] [24]

8 Experimentální metodika a experimentální ověření

Experimentální ověření na odstranění zbytkových napětí pulzujícím vodním paprskem bylo vykonáno v Ústavu geoniky AV ČR Ostrava – Poruba. Dále byly vzorky po procesu zpevňování vodním paprskem zátěžově zkoušeny na univerzitě v Graz.

Experiment se skládal ze dvou částí. V první řadě prošli materiály procesem pulzujícího vodního paprsku a v druhé části byly testovány zatěžovacími zkouškami na počet cyklů do únavového lomu.

8.1 Zpevňování součástí vodním paprskem

Provozní parametry na stroji byly nastaveny na hodnoty, které se během procesu měnily. Nastavovaly se odlišné pracovní tlaky na úkor odstupní vzdálenosti trysky od materiálu. Použity byly také dva typy trysek s rozdílnými tvary otvorů, první tryska měla otvor plochý a druhá s otvorem kruhovým Obr. Nastavení posuvové rychlosti a modulační frekvence zůstali stejné.



Obr. 12 Plochý a kruhový otvor trysky [25]

Faktory	Hodnoty	
tlak p [Mpa]	50, 60, 70, 80, 98	
Typ otvoru	Kruhový (MVT)	Plochý (Hammelmann)
Průměr otvoru d [mm]	0,7 mm	0,8 mm - 10°
Odstupní vzdálenost [mm]	12, 17, 80	2
Posuvová rychlost v [mm/s]	1,5 mm/s	
Modulační frekvence [Hz]	41,90 kHz	

Tab. 1 Provozní parametry stroje

Zkoušené materiály byly ve dvou typech. Materiál byl za studena tvarovaný plech o tloušťce 6,1 mm. Obě součásti byly zkoušeny ve všech krocích.

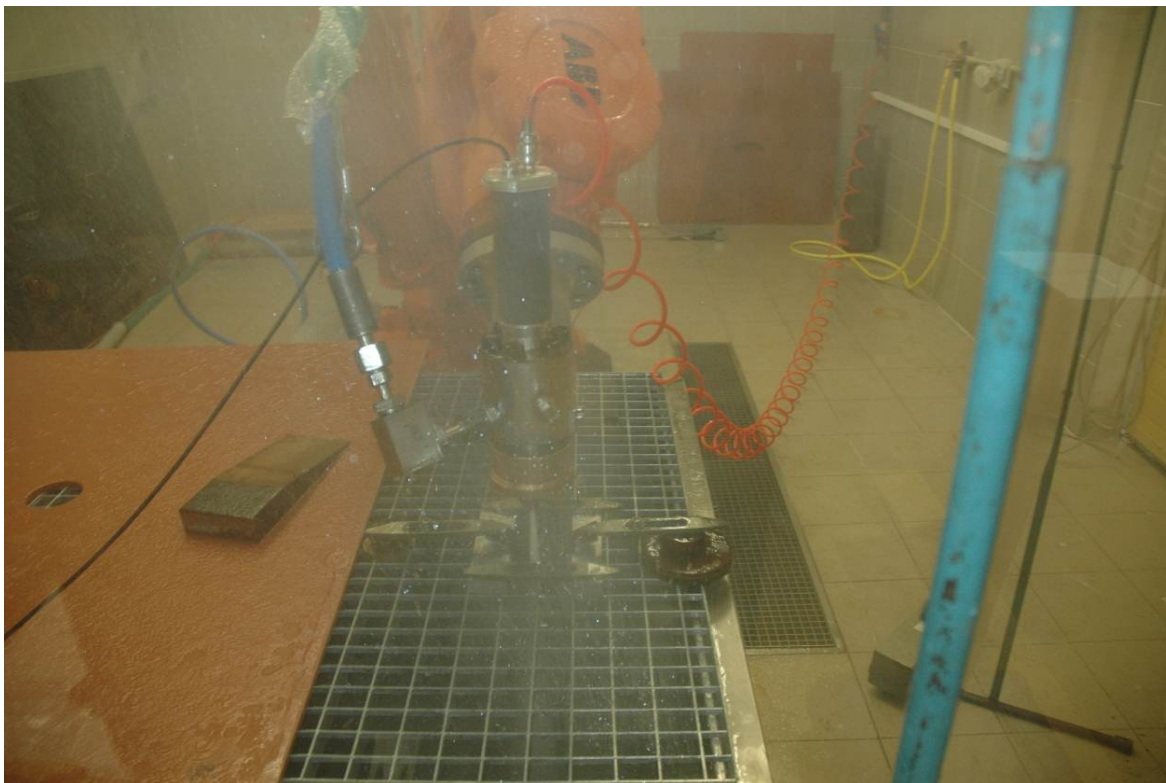
1. Materiál vzorku typu V - STN EN 10 025 – 1
2. Materiál vzorku typu S - STN EN 10 025 – 2

Tvar zkoušeného vzorku ve tvaru L (Obr. 12), který byl v ohnuté prostřední části podroben povrchové úpravě vodním paprskem. Trajektorie posuvu vodní trysky byla stanovena ve třech variantách pro zasažení hlavní části namáhaného místa.



Obr. 12 Experimentální zkoušené vzorky

Ustavení a upnutí vzorku na pracovním stole stroje bylo zajištěno upínkami, aby nedošlo k posunutí během operace. Vodní tryska uchycená na pohyblivém ramenu stroje, které určovalo trajektorii posuvu nad uchyceným vzorkem.



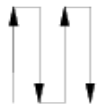
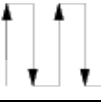
Obr. 13 Upnutý materiál na pracovním stole



Obr. 14 Proces povrchové úpravy na daném vzorku

8.2 Zátěžové zkoušky vzorků

Zátěžové zkoušky byly uskutečněny na univerzitě v Graz. Při zátěžových zkouškách se sledovala cyklická únava materiálu do lomu na povrchu. Hlavním faktorem bylo, aby materiál vydržel co nejvyšší počet cyklů. Nastavený režim na stroji měl tyto hodnoty : $F_{\max} = 4,25 \text{ kN}$, $F_{\min} = 0,42 \text{ kN}$ a $f = 4 \text{ Hz}$. Zkoušeny byly oba vzorky S a V. Poté následovala stejná zkouška na materiálu, který nebyl povrchově upraven vodním paprskem. Naměřené výsledky byly shrnuty do tabulky pro všechny kroky zkoušek.

Experiment č.	Typ trysky	Tlak [Mpa]	Posuv [mm/s]	Odstupní vzdálenost [mm]	Součást V	Součást S	Dráha
					N, cyklů	N, cyklů	
1	Ploché otvor trysky (Hammelmann) $d = 2 \text{ mm} - 10^\circ$	50	1	12	14147	21157	
2		60	1	17	20297	23533	
3		80	1	17	14477	26988	
4		80	1	17	16666	24491	
5	Kruhový otvor trysky (Stone age) $d = 2,8 \text{ mm}$	98	5	80	4887	5600	Střed 
6		98	1	80	7295	10503	
7		98	1	80	6950	10926	
8		70	1	80	9326	14452	
9	Minimální počet cyklů do únavového lomu bez povrchové úpravy vodním paprskem				21772	20552	
10	Minimální počet cyklů do únavového lomu bez povrchové úpravy vodním paprskem				25330	26750	

Tab. 2 Výsledné hodnoty zkoušek

Naměřené a výsledné hodnoty v tabulce č. 2 byly zjišťovány pro trysku s plochým a kruhovým otvorem při různých tlacích a odstupních vzdálenostech, ale také pro vzorky bez povrchové úpravy k porovnání výsledků naměřených hodnot.

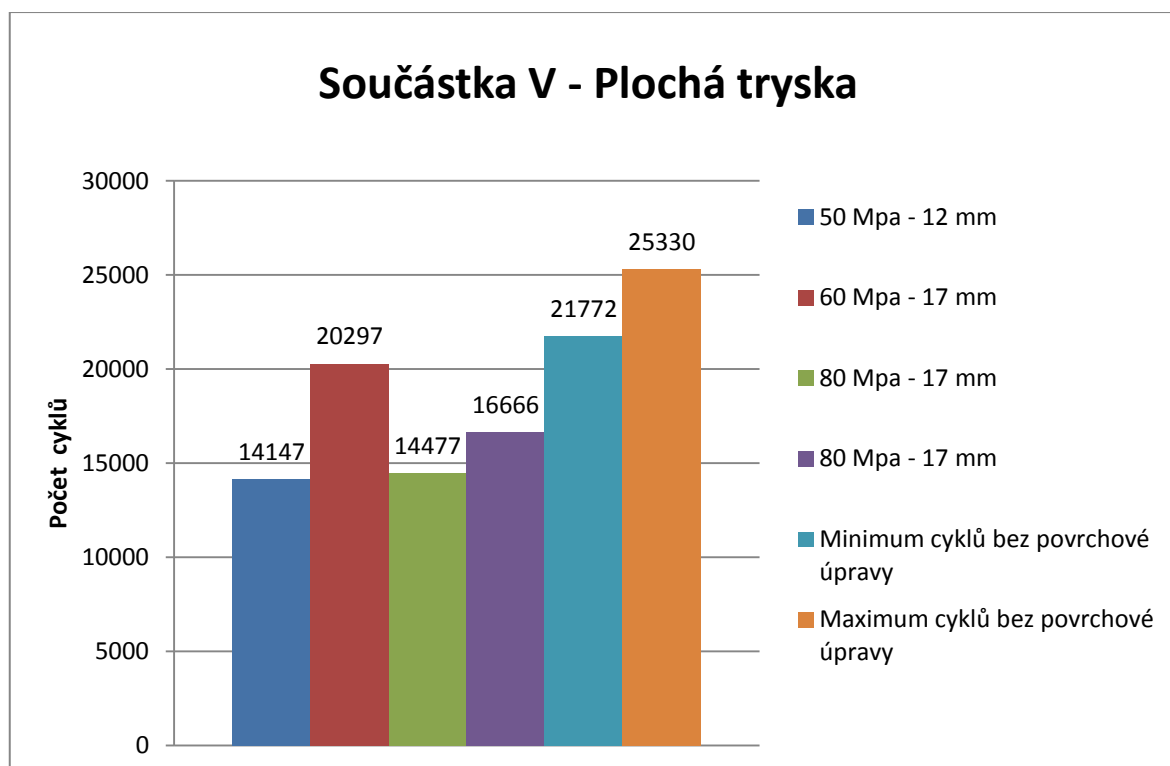
8.3 Experimentální výsledky

Hodnoty získané pro součástky typu V a S byly zpracovány do tabulek. Každá součástka podrobená povrchové úpravě se prováděla v několika krocích. Při použití trysky

s kruhovým otvorem, bylo naměřeno hodnot ve čtyřech krocích pro obě součásti. Plochá tryska byla použita také ve čtyřech případech, ale s mnohem menší odstupní vzdálenosti.

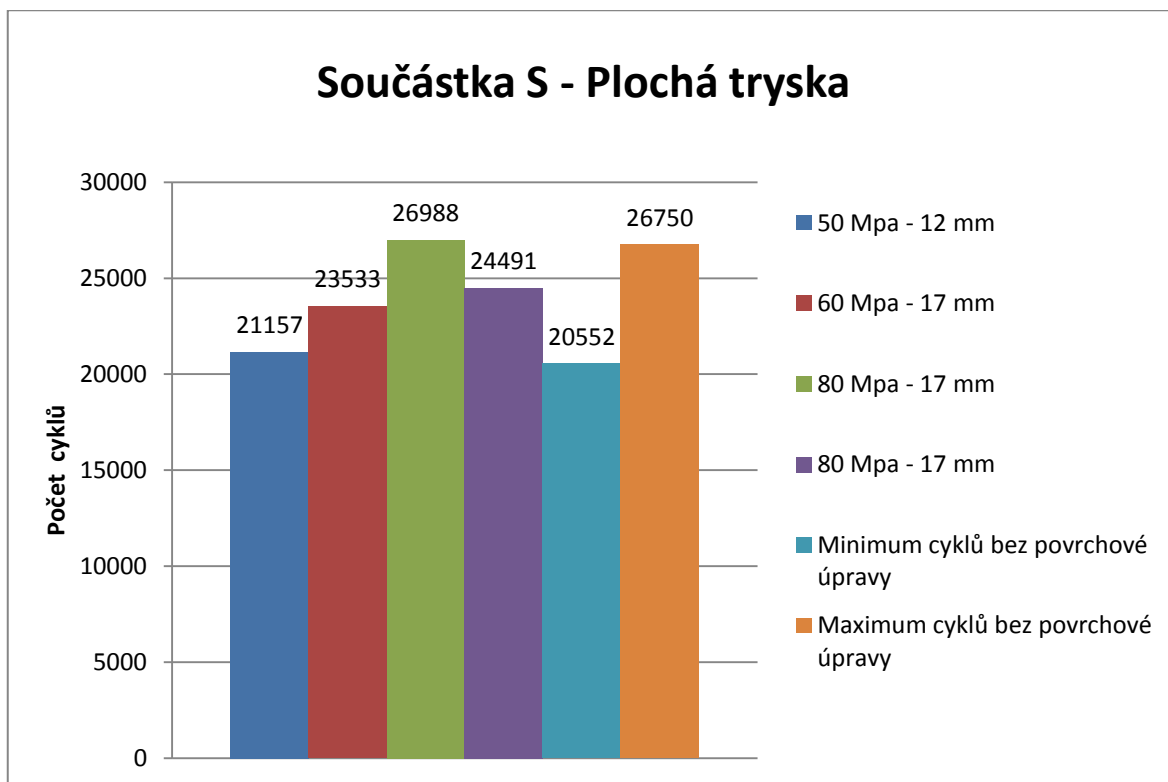
8.3.1 Ovlivnění napětí plochým pulzujícím proudem

Součásti podrobené pulzujícím vodním paprskem s plochým otvorem trysky byly vystaveny tlaku od 50 Mpa do 80 Mpa. Vyhodnocené výsledky podle počtu cyklů v zátěžových zkouškách jsou zaznamenány v grafu pro přehledné vyjádření. Také jsou v grafu znázorněny výsledky naměřené na součástkách, které nebyly podrobeny povrchové úpravě.



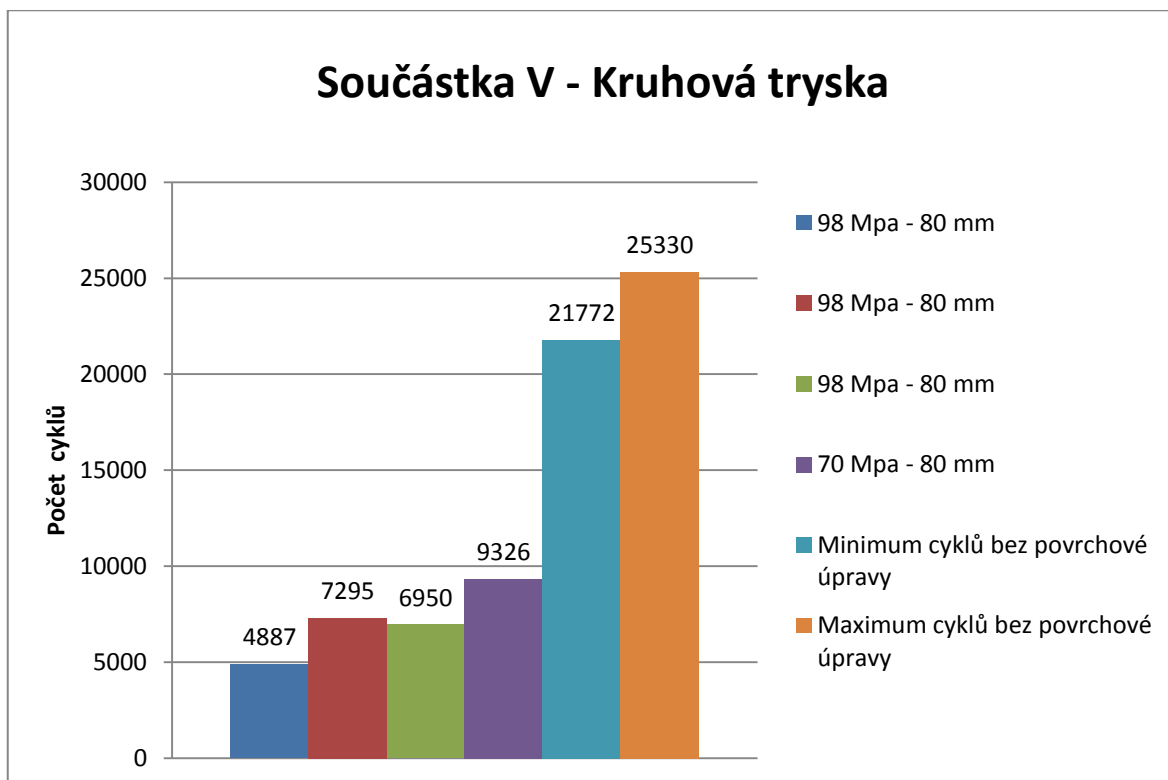
Obr. 15 Graf výsledků součástky V plochou tryskou

Na obrázku č. 15 je znázorněna grafická závislost počtu zátěžových cyklů zkoušené součástky V, která byla povrchově upravena plochou tryskou. Nejvyšší počet cyklů snesl materiál, který byl zpevňován při tlaku 60 Mpa a odstupní vzdálenosti 17 mm. Celkový počet, který materiál snesl je 20297 cyklů. U všech součástek byla posuvová rychlost nastavena na 1 mm/s. Z grafu je zřejmé, že při všech úpravách došlo k degradaci materiálu. Nejhorše dopadl materiál, který byl zpevňován při tlaku 50 Mpa a odstupní vzdálenosti 12 mm. Při zkoušce snesl pouze 14147 cyklů.



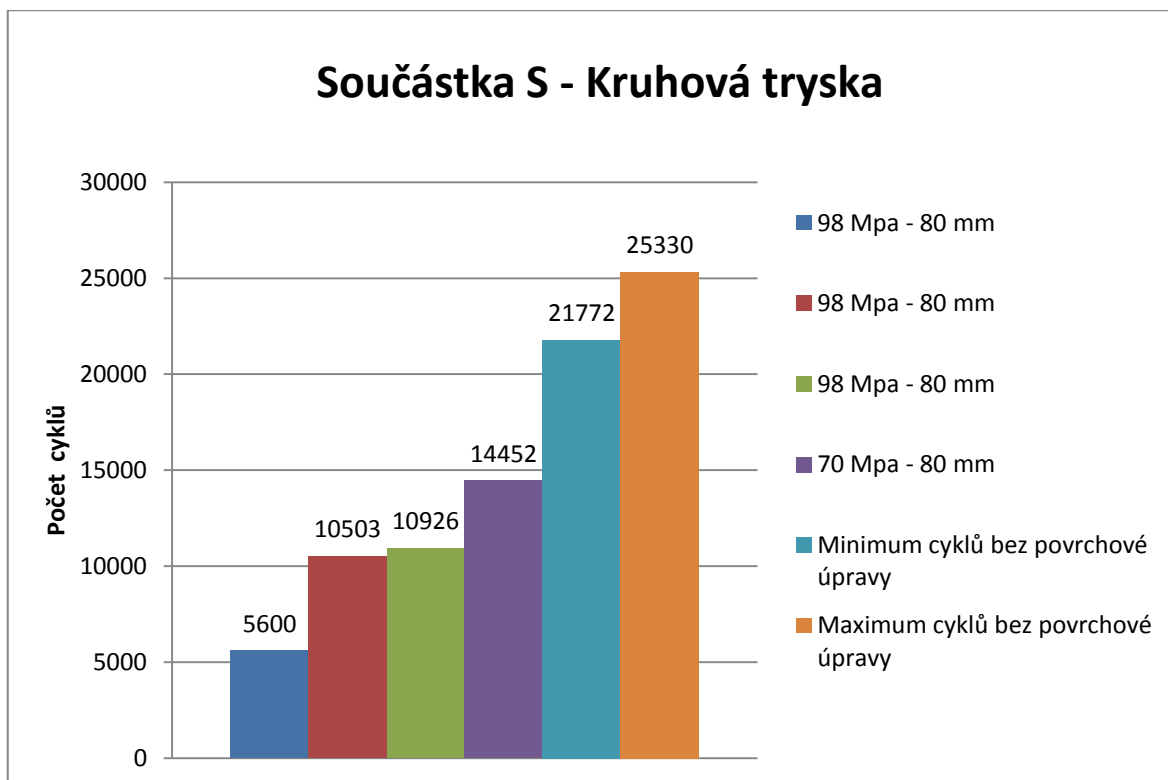
Obr. 16 Graf výsledků součástky S plochou tryskou

Při zpevňování vodním paprskem na součástce S došlo k odlišným výsledkům než u součásti V. Zde se počet cyklů pohyboval v rozmezí minimálního a maximálního počtu cyklů bez povrchové úpravy. Nejlépe dopadl materiál, který byl zpevňován při tlaku 80 Mpa a odstupní vzdálenosti 17 mm. Celkový počet, který materiál vydržel, byl 26988 cyklů, což je dokonce více, než maximální hodnota u materiálu bez povrchové úpravy. Materiál při těchto podmínkách dosáhl tedy o 238 cyklů více. Zároveň ostatní materiály neklesly pod minimální hodnotu, která byla 20552 cyklů. Ve všech případech byla posuvová rychlost nastavená na 1 mm/s.



Obr. 17 Graf výsledků součástky V kruhovou tryskou

Z obrázku č. 17 je zřetelné, že při použití kruhové trysky došlo k výrazným změnám materiálu. Hodnoty počtů cyklů byly výrazně nižší než u použití ploché trysky. Ve všech případech došlo ke značnému znehodnocení materiálu. Nejvyšší počet cyklů, který materiál snesl, byl 9326, což je více než dvakrát méně oproti minimální hodnotě materiálu bez povrchové úpravy. Vznik lokálních trhlin nastal při nízkých počtech zátěžových cyklů. V prvním případě, kdy byl pracovní tlak nastaven na 98 Mpa a 80 mm odstupní vzdálenosti, došlo ke změně rychlosti posuvu na 5 mm/s. Touto změnou bylo dosaženo nejhorších výsledků.



Obr. 18 Graf výsledků součástky S kruhovou tryskou

Při zkoušení materiálu S, který byl podroben povrchové úpravě kruhovou tryskou, bylo dosaženo obdobných výsledků, jako u materiálu V. Hodnoty jsou v průměru dvakrát nižší, než minimální počet cyklů na materiálu bez úpravy. Nejvyšší hodnota 14452 cyklů, byla dosažena při pracovním tlaku 70 Mpa a odstupní vzdálenosti 80 mm, tedy i v nejlepším případě došlo k poškození materiálu. V prvním sloupci lze vidět značný pokles cyklů, při zvýšení posuvové rychlosti z 1 mm/s na 5 mm/s.

9 Závěr a nový přístup k řešené problematice

Bakalářská práce se zabývala technologií vodního paprsku s použitím odstraňování zbytkových napětí na materiálu. Popisem principu této nekonvenční metody a zařízení. Dále technologickými obměnami výrobních procesů, které vedly ke změně tvrdosti materiálu. V experimentální části byl zkoumán pulzující vodní paprsek k odstranění zbytkových napětí. Zkoušeny byly dva druhy materiálu s jinými mechanickými vlastnostmi. Nastavení stroje a pracovních veličin se měnilo, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků měření.

Během zkoušení obou materiálu se nedosáhlo k optimálně vyhovujícím výsledkům. V porovnání materiálů V a S byl označen materiál S jako vyhovující v procesu ke snižování zbytkových napětí na materiálu vodním paprskem. Lze tedy říci, že z velké části u snižování zbytkových napětí záleží na typu a složení zkoušených materiálů. Vzorek V byl označen jako nevyhovující materiál k odstranění zbytkových napětí vodním paprskem. Při pátém kroku viz. (Tab. 2), kde byla rychlost posuvu zvýšená na 5 mm/s, došlo dokonce k znehodnocení materiálu a vznik povrchových zbytkových napětí v daném místě trajektorie vodního proudu. Během sledování při změně trajektorie nebyl zvláštní význam v rozdílných výsledcích.

Při řešení této problematiky, by se mělo zaměřit hlavně na trysku s plochým otvorem, která měla nejlepší výsledky. Také se zaměřit na ideální odstupní vzdálenost a ideální pracovní tlak. V těchto případech je trajektorie vodní trysky nejméně závislá na výsledcích při zátěžových zkouškách, avšak je možné zkoušet různé typy drah. Pulzující vodní paprsek se tak stále dostává do popředí strojírenských využití, ale při snižování zbytkových napětí je stále ve vývoji.

Seznam použité literatury

- [1] VALÍČEK, Jan. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu: teze habilitační práce*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 39 s. ISBN 978-80-248-1840-5.
- [2] *Pulzující vodní paprsek - technologie budoucnosti?* [online]. 2012 [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/pulzujici-vodni-paprsek-technologie-budoucnosti>
- [3] Foldyna J.: Use of Acoustic Waves for Pulsating Water Jet Generation. In: Beghi M. G. (ed.): *Acoustic Waves – From Microdevices to Helioseismology 1*. InTech Open Access Publisher, Rijeka 2011, s. 323–342.
- [4] Wikipedia-Water jet cutter [online]. poslední revize 9. 4. 2008,[cit. 2014-02-20]. Dostupné na World Wide Web: < http://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter >.
- [5] CNCdelfin. *Obrábění vodním paprskem* [online]. 2012 [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: <http://www.cncdelfin.cz/cnc-technologie>
- [6] KRAJNÝ, Zdenko. *Vodný lúč v praxi*. Bratislava: Epos, 2001. ISBN 80-8057-091-4.
- [7] AROLA, Dwayne D.; MCCAIN, Mark L. Abrasive waterjet peening: a new method of surface preparation for metal orthopedic implants. *Journal of biomedical materials research*, 2000, 53.5: 536-546.
- [8] BOTHELL, Dave, et al. *Method and apparatus for ultra high pressure water jet peening*. U.S. Patent No 5,778,713, 1998.
- [9] HLOCH, Sergej a Jan VALÍČEK. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. prvné. Prešov: Grafotlač Šoltýs, 2008, 125 s. ISBN 978-80-553-0091-7.
- [10] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. 1. vyd. Košice: Viena, 2000, 275 s. ISBN 80-709-9430-4.

- [11] AROLA, Dwayne D.; MCCAIN, Mark L. *Method and apparatus for abrasive for abrasive fluid jet peening surface treatment*. U.S. Patent No 6,502,442, 2003.
- [12] FLECK, James N.; SHAW, James S. *Method for surface enhancement by fluid jet impact*. U.S. Patent No 6,135,857, 2000.
- [13] FOLDYNA, J., L. SITEK, J. SCUCCA, P. MARTINEC, J. VALICEK, AND K. PALENIKOVA. 'Effects of Pulsating Water Jet Impact on Aluminium Surface', *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 209, No. 20, 6174 - 6180, 2009.
- [14] KLICH, J. FOLDYNA, J. HLAVACEK, P. ZELENAK, M. SCUCCA, J. Influence of number of pulses impact on surface topography generated by the action of pulsating water jet. *Proceedings of International Symposium on Earth Science and Technology 2011*, Fukuoka, Japan, p. 69-74, ISBN978-4-9902356-1-1.
- [15] Laser Hardening. *MATEX PM* [online]. 2011 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.matexpm.com/en/laser-hardening>
- [16] Laserové kalení. *Laser Therm* [online]. 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/>
- [17] Tribotechnika. GERSTENBERGER, Jan. *Vytváření tvrdých a oteruvzdorných povrchů pomocí boridování* [online]. 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52013/vytvareni-tvrdych-a-oteruvzdornych-povrchu-pomoci-boridovani.html>
- [18] *Abrasiv* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://eshop.abrasiv.cz/editor/image/eshop_products/LMGRANAT80_1.jpg
- [19] *JAP Trading* [online]. 2010 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.jap.cz/ostatni-produkty/zaruvzdorne-materialy-a-vyzdivky/olivin/>
- [20] IPFonline. KUSHAL, Udhyog a Nagar KRISHNA. *Parameters for Effective Abrasive Blasting* [online]. 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.ipfonline.com/IPFCONTENT/articles/parameters-for-effective-abrasive-blasting.php>

- [21] Wikipedia. MOMBBER, A.W. *Shot peening* [online]. 2008 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Shot_peening
- [22] Metal Improvement Company. *Air Nozzle Peening* [online]. 2010 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: http://www.metalimprovement.com/shot_peening/air_nozzle_shot_peening.php
- [23] Tumlikovo. *Cementování* [online]. 2010 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/procesy/chemicko-tepelne-zpracovani-kovu/cementovani/>
- [24] Vybrané technologie povrchových úprav. In: DAŘOUREK, Karel. *Cementování* [online]. 2006 [cit. 2014-03-23]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/08cementace.pdf
- [25] Wikimedia. *Round and flat jet nozzles* [online]. 2011 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Round_and_flat_jet_nozzles.jpg
- [26] *Sharp Shot* [online]. 2003 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.mrrinc.com/#!copper-slag/cp4j>
- [27] *Vodní paprsek - výzkum, vývoj, aplikace*. Ostrava: Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., 2013.
- [28] *Abraziva* [online]. 2007 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.abraziva.cz/abrazivo-granat/>
- [29] *Příroda* [online]. 2004 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=2555>